
绪 论



在科学和工程技术领域中常常需要对信号进行分析与处理。随着计算机和信息科学的飞速发展,信号分析与处理在工程技术领域应用越来越广泛,并且所起的作用也越来越大。那么,什么是信号?信号是如何分类的?如何采集信号?信号分析与处理的目的、内容、方法及特点是什么?信号分析与处理有哪些方面的应用,以及它的发展趋势如何?这些就是本章要介绍的内容。

0.1 信号的定义及分类

信息是信号的具体内容,信号是信息的物理表现形式,它反映了物理系统的状态与特性,是信息的函数。广义地说,任何带有信息的事物,如电压、电流、温度和压力等各种物理量,以及语音和图像等,均可称为信号。一般说来,电压和电流等是一个独立变量(时间)的函数;图像在平面坐标系中是两个独立变量的函数;气温和风速等则是取决于纬度、经度和高度这三个独立变量的函数。本课程只讨论作为一个独立变量函数(一般设定为时间 t)的信号,即一维信号。

0.1.1 连续时间信号与离散时间信号

按照自变量 t 的取值特点,可以把信号分为连续信号和离散信号。如果在所讨论的时间间隔内,除有限个不连续间断点之外,对于任何时间值都可以给出确定的函数值,则此信号就称为连续信号,如图 0.1.1 所示。连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的(只取某些规定的值)。时间和幅值都是连续的信号又称为模拟信号。在实际应用中,模拟信号与连续信号两名词往往不予区分。

与连续信号对应的是离散信号。离散信号在时间上是离散的,即只在某些不连续的规定瞬间给出函数值,在其他时间没有定义,如图 0.1.2 所示。给出函数值的离散时刻的间隔可以是均匀的,也可以是

不均匀的,一般情况下,都采用均匀间隔。这时,自变量 t 简化为用整数序号 n 表示,函数符号写作 $f(n)$ 。

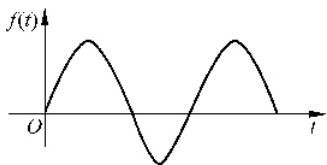


图 0.1.1 连续信号

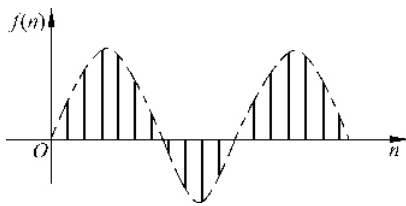


图 0.1.2 离散信号

信号也可以分为模拟信号和数字信号。模拟信号在时间上和幅度上是连续的;数字信号在时间上和幅度上是离散的,且可以用有限字长表示。

0.1.2 能量信号与功率信号

从能量的观点来研究信号,把信号 $x(t)$ 看作加在 1Ω 电阻上的电流,则在时间间隔 $-T \leq t \leq T$ 内所消耗的能量为

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x^2(t) dt \quad (0.1.1)$$

其平均功率为

$$G = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt \quad (0.1.2)$$

若信号函数平方可积,则 W 为有限值,该信号称为能量有限信号,简称能量信号。一般地,有限长信号为能量信号。

若信号 $x(t)$ 的 W 趋于无穷(相当于 1Ω 电阻消耗的能量),而 G (相当于平均功率)为不等于零的有限值,则该信号为功率信号。一个幅值有限的周期信号或随机信号其能量是无限的,但是只要功率有限,则该信号就为功率信号。

一个信号可以既不是能量信号,也不是功率信号,但是不可能既是能量信号又是功率信号。

0.1.3 确定性信号与随机信号

信号也可以分为确定性信号和非确定性信号两大类。能够精确地用明确的数学关系式来描述的信号称为确定性信号;不能精确地用明确的数学关系式来描述,且无法预测任意时刻的精确值的信号称为随机信号,它只能用概率术语和统计平均来描述。

许多物理现象产生的信号是可以相当精确地用数学关系式来表示的。例如,振动台的正弦振动,电容器通过电阻放电时两端电压的变化,单摆受脉冲作用的

振动响应,卫星在轨道上围绕地球的运动等,基本上都是确定性信号。但是,也有许多其他物理现象产生的信号是随机的。例如,汽车和火车运行时的振动,起伏海面的波动,噪声发生器输出的电信号等,都不能用精确的数学关系式来描述,且无法预测任意时刻的精确值,所以这些信号在性质上是随机的。

某种信号究竟是确定性的还是随机的,在许多场合是很难确定的。例如,某些意外的因素影响了产生信号的物理现象,导致其偏离原有的规律。因此真正确定性的信号在实际中是没有的。但是,另一方面,如果对产生信号的物理现象的基本规律有足够的认识,就可以用精确的数学公式来描述它。因此真正随机的信号也是不存在的。

0.2 信号分析与处理系统简介

信号分析与处理系统主要由抗混叠滤波器、A/D(模拟数字)转换器、数字信号处理器、输出显示器、D/A(数字模拟)转换器和输出滤波器组成,如图 0.2.1 所示。

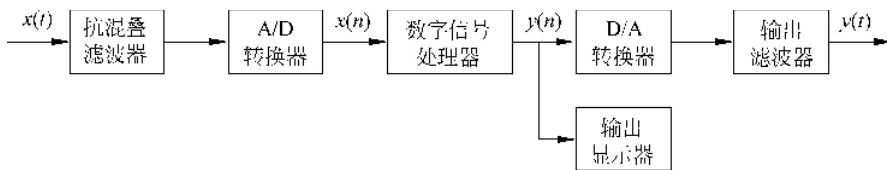


图 0.2.1 信号分析与处理系统组成方框图

在工农业生产和国防建设中,要处理的各种物理、化学和生物量大多数是以连续的模拟信号形式出现的。模拟输入信号 $x(t)$ 首先通过一个模拟的抗混叠滤波器,将输入信号的最高频率限制在一定范围之内,以避免频谱混叠,然后,送到 A/D 转换器。因为要进行数字信号处理,所以必须把模拟信号转换成数字信号,实现这一转换功能的器件是 A/D 转换器。具体地说, A/D 完成连续信号的采样、量化和编码。对连续的模拟信号 $x(t)$,按一定的时间间隔 T_s ,抽取相应的瞬时值(也就是通常所说的离散化),这个过程称为采样。 $x(t)$ 经过采样后转换为时间上离散的模拟信号 $x_s(nT_s)$,即幅值仍是连续的模拟信号,该信号简称为采样信号。把 $x_s(nT_s)$ 以某个最小数量单位的整数倍来度量,这个过程称为量化。 $x_s(nT_s)$ 经量化后变换为量化信号 $x_q(nT_s)$,再经过编码,转换成离散的数字信号 $x(n)$,即时间和幅值都是离散的信号,该信号简称为数字信号。数字信号处理器负责对数字信号进行分析与处理,例如进行滤波,去掉信号中的所有不必要的频率成分;同时,也负责对系统中的其他器件进行控制。这里的数字信号处理器是个广义的概念,它可以是个人计算机,可以是单片的数字信号处理器(digital signal processors, DSPs),也可以是专用的数字信号处理设备。

$x(n)$ 经过数字信号处理器的加工后,变成了另一个数字信号 $y(n)$ 。这时,一方面可以通过显示器将它显示出来;另一方面,也可以通过 D/A 转换器将它转换成模拟信号,再进行平滑滤波,用于控制。

0.3 信号分析与处理的目的和内容

为了充分地获取信息和有效地利用信息,必须对信号进行分析与处理。所谓信号分析,就是通过解析方法或测试方法找出不同信号的特征,从而了解其特性,掌握它随时间或频率变化的规律的过程。通过信号分析,可以将一个复杂的信号分解成若干简单信号的分量之和,或者用有限的一组参量去表示一个复杂波形的信号,并由这些分量的组成情况或者这组参量去考察信号的特性。信号分析是获取信号源或信号传递系统特征信息的重要手段,人们往往通过对信号特征的深入分析,得到信号源或者系统特性、运行情况甚至故障等信息,这正是故障诊断的基础。

所谓信号处理,就是指通过对信号的变换和加工,把一个信号变换成另一个信号的过程。例如,为了有效地利用信号中包含的有用信息,采用一定的手段剔除原始信号中混杂的噪声,削弱多余的分量,这个过程就是最基本的信号处理过程,因此也可以把信号处理理解为为了特定的目的,通过一定的手段改造信号的过程。

对模拟信号进行处理,既可以使用模拟系统,也可以使用数字系统。在用数字系统进行处理时,需要先将模拟信号数字化,使之成为数字信号,然后用数字系统进行处理,得到一个处理后的数字信号,再经过数模转换得到所需要的模拟信号。对数字信号进行处理是将数字化的序列输入到数字系统,如计算机,经过预定算法的程序处理,得到数字输出信号。

数字信号处理的基本内容包括:

- (1) 一维数字信号处理;
- (2) 多维数字信号处理;
- (3) 用超大规模集成电路及其硬设备来实现的各种数字信号处理算法。

一维数字信号处理包括离散傅里叶变换和各种其他变换,以及与之相应的各种快速算法、谱分析、滤波及数字信号处理的应用等。多维数字信号处理包括图像处理,传感器阵列处理和多维数字处理(包括谱分析、多维数字滤波、多维变换、多维快速算法和多维结构的实现)等。超大规模集成电路及其硬设备的实现包括算法和网络结构、硬设备与程序编制及器件等。目前各种专用的信号处理器及具有很强功能的信号处理芯片不断涌现,为数字信号处理技术不断增添新的内容。

与模拟处理方法相比,数字处理方法有以下明显的优点。

- (1) 精度高 在模拟处理系统中,元器件要达到很高的精度是比较困难的,而

对于数字处理系统,只要有足够的字长就可以达到很高的分辨率和精度。例如,基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪,其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。

(2) 稳定性好 数字信号处理系统由少量大规模集成电路的标准组件所组成,工作稳定可靠;而模拟处理系统的元器件易受温度影响,并且容易产生感应和寄生振荡等。

(3) 灵活性强 数字信号处理采用专用的或通用的数字系统,其性能取决于运算程序和乘法器的各个系数,这些均存储在数字系统中,只要改变运算程序或系数,即可改变系统的特性,比模拟系统方便得多。

(4) 便于大规模集成 在数字处理系统中,数字部件具有高度规范性,便于大规模集成和大规模生产,没有模拟网络中各种电感器、电容器及各种非标准件。特别是对低频信号,如在遥测中或地震波的分析中,需要过滤数赫[兹]或数十赫[兹]的信号,用模拟网络进行处理时,电感器的数值和体积都将大到惊人的程度,甚至不可能获得很好的选择性,这时选用数字信号处理就会体现出它性能的优越性。

(5) 数字信号处理系统可以获得很高的性能指标 例如,有限长脉冲响应数字滤波器可以实现准确的线性相位特性,这些特性用模拟系统都是很难达到的。

(6) 可以实现多维信号处理 利用庞大的存储单元,可以存储二维的图像信号或多维的阵列信号,以及实现二维和多维的滤波和谱分析等。

0.4 信号分析与处理的发展和应用

近四十年来,数字信号处理已逐渐发展成为一门非常活跃的、理论与实际紧密结合的应用基础学科,这主要归功于以下几个重要因素。

(1) 20 世纪 60 年代中期以后高速数字计算机的发展已颇具规模,它可以处理较大的数据量。

(2) 快速傅里叶变换(FFT)的提出,在大多数实际问题中能使离散傅里叶变换(DFT)的计算时间成数量级地缩短;此外,还提出了若干高效的数字滤波算法。

(3) 大规模集成电路的发展,使数字信号处理已不再限于在通用计算机上实现,而且可用数字部件组成的专用硬件实现。很多通用组件已单片化,甚至某些具有独立处理功能的系统已单片化。这些都极大地降低了成本、减小了体积并缩短了研制时间。

数字信号处理技术作为一门新兴学科,由于技术的先进性和应用的广泛性,越来越显示出强大的生命力,凡是需要对各种各样的信号进行谱分析、滤波、压缩等的科学领域和工程领域都要用到它,这种趋势还在发展。数字信号处理在语音处理、通信系统、声纳、雷达、地震信号处理、空间技术、自动控制系统、仪器仪表、

生物医学工程和家用电器等方面得到了广泛应用。

下面简单介绍数字信号处理的应用。

(1) 信号处理 如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、相关运算、谱分析、卷积、模式匹配、加窗、波形产生等。

(2) 通信 如调制解调器、自适应均衡、数据加密、数据压缩、回波抵消、多路复用、传真、扩频通信、纠错编码、可视电话等。

(3) 语音 如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认、语音邮件、语音存储等。

(4) 图形/图像 如二维和三维图形处理、图像压缩与传输、图像增强、动画、机器人视觉等。

(5) 仪器仪表 如频谱分析、暂态分析、函数发生、锁相环、勘探、模拟试验等。

(6) 医疗电子 如助听器、CT 扫描、超声波、心电图、核磁共振、医疗监护等。

(7) 军事与尖端科技 如雷达和声纳信号处理、导弹制导、火控系统、导航、全球定位系统、尖端武器试验、航空航天试验、宇宙飞船、侦察卫星等。

(8) 消费电子 如数字电视、高清晰度电视、数字电话、高保真音响、音乐合成等。

0.5 MATLAB 简介

学习信号分析与处理技术,不仅要掌握其基本原理和方法,还要能用计算机语言编制相应的程序,实现其算法,得出正确的结果。这就少不了一个方便和实用的编程语言和环境,而 MATLAB 就是一种非常好的用于科学计算的可视化、高性能的语言和软件环境,它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体,构成了一个界面友好的用户环境。在这个环境中,问题与求解都能方便地以数学语言(主要是矩阵形式)或图形方式表示出来。

MATLAB 的含意是矩阵实验室(matrix laboratory),该软件是一个交互式系统,其基本元素是无需定义维数的矩阵。它研制的初衷主要是方便矩阵的存取。但是经过几十年的扩充和完善,它已成为各类科学研究与工程应用中的标准工具,数字信号处理就是其中的一个典型的应用。

MATLAB 包括称为工具箱(toolbox)的各类应用问题的求解工具,其中信号处理工具箱包含各类经典的和现代的数字信号处理技术,是一个非常优秀的算法研究与辅助设计工具,它在语音信号处理、实时控制、仪器仪表和生物医学工程等多个研究领域都得到了成功的应用。

本书在各章中将给出相应的 MATLAB 的函数和一些程序示例。



连续时间信号的分析方法通常可以分为时域分析法、频域分析法和复频域分析法。时域分析,又称为波形分析,它是研究信号的幅值等参数、信号的稳态和交变分量随时间的变化情况的一种信号分析方法,其中最常用的是把一个信号在时域上分解为具有不同延时的简单冲激信号分量的叠加,并通过卷积的方法进行系统的时域分析。频域分析是将一个复杂信号分解为一系列正交函数的线性组合后,再把信号从时域变换到频域中进行分析,其中最基本的是把信号分解为不同频率的正弦分量的叠加,即采用傅里叶变换(级数)的方法来进行信号分析,这种方法也称为频谱分析或傅里叶分析。复频域分析是以复指数函数 e^{st} (其中,复频率 $s = \sigma + j\Omega$ 为分析变量,式中 σ 为复变量 s 的实部, Ω 为复变量 s 的虚部) 作为基本信号,将任意输入信号分解为一系列不同复频率的复指数分量的叠加,即采用拉普拉斯变换的方法来进行信号分析,故又称为拉普拉斯变换分析。

1.1 连续时间信号的时域分析

许多复杂的信号往往是由一些典型的基本信号组成的。在信号的时域分析中,最重要的方法是将信号分解为冲激信号的叠加,在这一基础上,系统响应就可以应用卷积积分的方法来求解,而卷积的概念与相关函数有密切的联系。因此,下面首先介绍包括冲激信号在内的几种基本的连续信号,然后再讨论卷积的概念。

1.1.1 连续信号的时域描述

由于连续时间信号在其定义的任意时刻都应当具有确定的数值,且通常可以由一个确定的时间函数式来表示,因此信号的时域描述就是指以一个时间函数式表示信号随时间而变化的特性。

1. 连续时间信号的定义

所谓连续时间信号(continuous signal),又简称为连续信号,就是指在所讨论的时间内,对于除了若干个不连续点以外的任意时刻值都有定义的信号,一般用数学函数 $x(t)$ 表示,如图 1.1.1 所示。

这里“连续”是指函数的定义域——时间是连续的,而信号的值域可以是连续的,也可以不是。例如,单边指数信号(如图 1.1.2 所示)

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Ae^{-\alpha t}, & t > 0 (\alpha > 0, \text{式中 } \alpha \text{ 为单边指数信号 } x(t) \text{ 的衰减系数}) \end{cases}$$

其中 A 是常数。它的定义域为 $(-\infty, \infty)$,其函数的值也可取 $0 \sim A$ 之间的任意值,因而它是连续时间信号,但是在 $t=0$ 处,函数有间断点(即不连续点)。

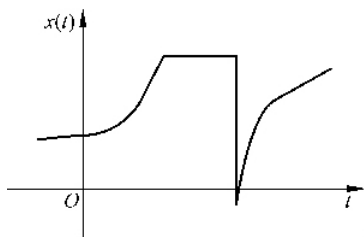


图 1.1.1 连续时间信号

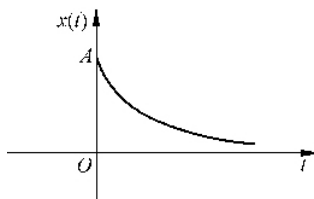


图 1.1.2 单边指数信号

2. 基本的连续信号^[1]

在连续时间信号的分析中,绝大多数的常用信号都可以用一些基本信号及其变化形式来表达,因此,对这些基本信号的分析可以说是信号分析与处理的基础。这些基本的连续信号包括正弦信号、抽样信号、阶跃信号、冲激信号和复指数信号等。

(1) 正弦信号(sinusoidal signal)

一个正弦信号(如图 1.1.3 所示)可描述为

$$x(t) = A \sin(\Omega t + \varphi) = A \cos\left(\Omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.1.1)$$

式中, A 为振幅, Ω 为角频率(rad/s), φ 为初相位(rad)。正弦信号是周期信号,其周期 T 为

$$T = 2\pi/\Omega$$

由于正弦信号与余弦信号只是在初相角上相差 $\pi/2$,因此通常将它们统称为正弦型信号。正弦型信号具有下列性质:

① 两个振幅和初相位均不同的同频率正弦信号相加后,其结果仍是原频率的正弦信号;

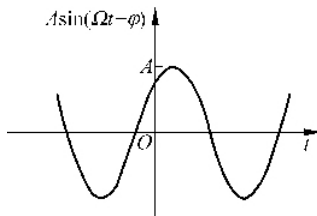


图 1.1.3 正弦信号

② 若一个正弦信号的频率是另一个正弦信号频率的整数倍,则它们的合成信号是一个非正弦周期信号,其周期就等于基波的周期;

③ 正弦信号对时间的微分或积分仍然是同频率的正弦信号。

(2) 抽样信号(sampled signal)

抽样信号的表达式为

$$\text{Sa}(t) = \sin t/t \quad (1.1.2)$$

抽样信号在信号处理理论中起着重要的作用,它又称为插值函数或滤波函数,它可以用 $\text{Sa}(t)$ 或 $\text{sinc}(t)$ 来表示,且有 $\text{Sa}(x) = \text{sinc}(x/\pi)$ 或 $\text{sinc}(x) = \text{Sa}(\pi x)$,其波形如图 1.1.4 所示。

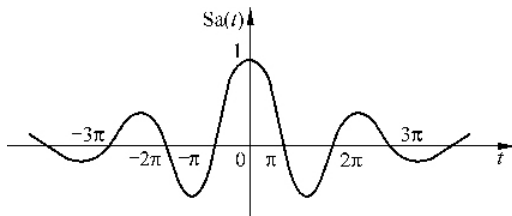


图 1.1.4 抽样信号

由式(1.1.2)可见,抽样信号 $\text{Sa}(t)$ 具有以下性质:

① $\text{Sa}(t)$ 是关于 t 的偶函数;

② $\text{Sa}(t)$ 是一个以 2π 为周期,且具有 $1/t$ 的单调衰减幅值的振荡信号;

③ 除 $t=0$ 外它具有确定的值,当 $t = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$ 时, $\text{Sa}(t) = 0$, 且有

$$\int_0^{\infty} \text{Sa}(t) dt = \frac{\pi}{2} \quad (1.1.3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Sa}(t) dt = \pi \quad (1.1.4)$$

④ 利用罗比塔(L'Hospital)法则,在 $t=0$ 时, $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t} = 1$ 。

(3) 单位阶跃信号(unit step signal)

单位阶跃信号的定义为

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (1.1.5)$$

其波形如图 1.1.5 所示。在跃变点 $t=0$ 处,函数值未定义。

若单位阶跃信号的跃变点在 $t=t_0$ 处,则称其为延时单位阶跃信号,其数学表达式为

$$u(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (1.1.6)$$

其波形如图 1.1.6 所示。

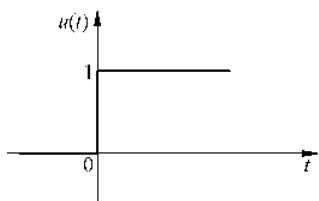


图 1.1.5 单位阶跃信号

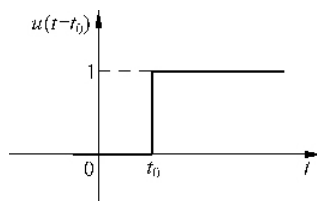


图 1.1.6 延时单位阶跃信号

(4) 单位冲激信号(unit impulse signal)

单位冲激信号 $\delta(t)$ 是由英国物理学家狄拉克(P. A. M. Dirac)于 1930 年首先提出的,故又称为狄拉克函数或 δ 函数。它不能用普通的函数来定义的,其工程定义为

$$\begin{cases} \delta(t) = 0, & t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \quad (1.1.7)$$

上述定义表明, $\delta(t)$ 函数除了原点以外,其值为零,并且具有单位面积值(该面积值又称为冲激信号的强度)。通常,用一个带箭头的线段表示冲激信号,其冲激强度标注在箭头旁,并加括号注明,如图 1.1.7 所示。

若单位冲激信号出现在 $t = t_0$ 处,则可以得到一个具有延时的单位冲激信号 $\delta(t - t_0)$,其数学表达式为

$$\begin{cases} \delta(t - t_0) = 0, & t \neq t_0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \end{cases} \quad (1.1.8)$$

其波形如图 1.1.8 所示。

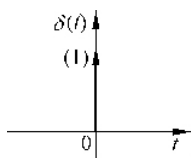


图 1.1.7 单位冲激信号

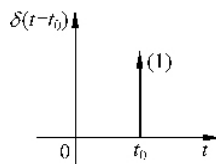


图 1.1.8 延时单位冲激信号

由单位冲激信号的定义可得

$$\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} = u(t) \quad \text{或} \quad \delta(t) = \frac{du(t)}{dt} \quad (1.1.9)$$

该式表明,单位阶跃信号是单位冲激信号的积分;反之,单位冲激信号则是单位阶跃信号的导数。

单位冲激信号是一个非常特殊的信号,具有以下重要的特性: